

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikan koulutusohjelma / Käyttö- ja kunnossapito

Antti Hellén

PIENVESITURBIININ KÄYTTÖ ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMISESSA

Opinnäytetyö 2014

# TIIVISTELMÄ

## KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

### Energiatekniikka

HELLÉN, ANTTI

PIENVESITURBIININ KÄYTTÖ ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMISESSA

Opinnäytetyö

43 sivua

Työn ohjaaja

Pt. tuntiopettaja Hannu Sarvelainen

Toimeksiantaja

Kymenlaakson ammattikorkeakoulu

Huhtikuu 2014

Avainsanat

turbiini, vesivoima, virtaus, energiatehokkuus

Tämän insinöörityön tarkoituksena on selventää vesiturbiinin ja vesivoimalan suunnittelussa tarvittavia tietoja. Tietoja työhön on saatu ammattiosaamisesta sekä turbiinikirjallisuudesta. Tarkastelun kohteena on pienvesiturbiini ja siitä erityisesti Kaplan-mallinen turbiini. Mukana on myös selvitystä muistakin turbiinimalleista.

Työ jakautuu viiteen osaan. Ensimmäisessä on selvitetty yleisiä vesiturbiiniasioita ja eri malleja. Toisessa on selvitetty voimalaitoksen eri kokonaisuudet. Kolmannessa on selvitetty turbiinin teoriaan liittyvää hydrodynamiikkaa. Neljännessä on käyty läpi turbiinin eri osat ja niiden mitoitus ja viimeisessä viidennessä osassa hieman turbiinin käytännön asioita liittyen turbiinin asentamisesta viemäriverkostoon.

Tarkasteltavien asioiden mitoitus on pyritty katsomaan turbiinin suunnittelijan näkökulmasta ja mukana on ohjeita siitä, miten laitteita ja asioita tulee mitoittaa. Mukana on lisäksi hieman talouteen liittyviä kannattavuuslaskelmia turbiinilaitoksesta. Talousluvut perustuvat vuoden 2014 hintoihin ja näihin tulee lisätä inflaatiovaikutukset myöhemmän vertailun pohjaksi.

Työ osoittaa, että turbiineja on teknisesti mahdollista asentaa kaikkialle, missä vain vesi virtaa ja löytyy putouskorkeutta. Tosin laitosten kannattavuuden kanssa on hieman vaikeuksia. Karkeasti sanoen, että mitä enemmän löytyy putouskorkeutta ja virtaavaa vettä, sitä helpompi on saada turbiinilaitokset taloudellisesti kannattaviksi.

## ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Energy Engineering

HELLÉN, ANTTI

How to Use Small Scale Water Turbines Achieving Better  
Energy Efficiency

Bachelor's Thesis

43 pages

Supervisor

Hannu Sarvelainen, Lecturer

Commissioned by

April 2014

Keywords

turbine, water power, flow, energy efficiency

The purpose of this thesis was to provide understanding of what is required when designing water turbines and water power plants. The source for this thesis was a mixture of professional experience as water turbine designer and related professional literature. This thesis concentrates on small water turbines and especially Kaplan design. An overview of other turbine models are also included.

This thesis has five main chapters. The first chapter will be explaining turbines on general level and also provides understanding on various turbine models. The second chapter is explaining different components of a water power plant. The third chapter is explaining in detail the hydrodynamics and technical theory behind turbine design. The fourth chapter explains turbine design on detail level including measurements and parts of turbines, and the thesis is a summary with practical example when implementing water turbines as part of sewer system. Personal background made it possible to investigate the turbines from a professional point of view. An example of profitability calculation of water turbine installation is included, based on 2014 rates.

The intention of this thesis was to prove that water turbines can be installed on different locations, basic requirement being that there is running water available. The key challenge is to design the power plants in a way that the plant will provide profit on all partners.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

|       |                                   |    |
|-------|-----------------------------------|----|
| 1     | YLEISTÄ VESIVOIMASTA              | 7  |
| 1.1   | Toimintaperiaate                  | 7  |
| 1.2   | Vesivoiman määrä Suomessa         | 8  |
| 1.3   | Pienvesivoiman osuus vesivoimasta | 8  |
| 1.4   | Vesiturbiinit                     | 9  |
| 1.4.1 | Pelton-turbiini                   | 9  |
| 1.4.2 | Francis-turbiini                  | 10 |
| 1.4.3 | Kaplan-turbiini                   | 11 |
| 1.4.4 | Crossflow-turbiini                | 12 |
| 1.4.5 | Kiinteäsiipinen putkiturbiini     | 12 |
| 2     | VOIMALAITOSRAKENTEET              | 14 |
| 2.1   | Betonirakenteet                   | 14 |
| 2.1.1 | Voimalaitosrakennus               | 14 |
| 2.1.2 | Padot                             | 15 |
| 2.2   | Tuloputki                         | 15 |
| 2.3   | Imuputki                          | 16 |
| 2.4   | Tulvaluukku                       | 17 |
| 2.5   | Välppä                            | 18 |
| 2.6   | Vesitien sulkulaitteet            | 19 |
| 2.6.1 | Tuloputken sulkuluukku            | 19 |
| 2.6.2 | Läppäventtiili                    | 20 |
| 2.6.3 | Turbiinin sulkulaite              | 21 |
| 2.6.4 | Settiurat                         | 21 |
| 2.6.5 | Imuputken sulkuluukku             | 21 |
| 3     | TURBIININ HYDRODYNAMIIKKA         | 22 |
| 3.1   | Putouskorkeus                     | 22 |
| 3.2   | Vesivoimalaitoksen teho           | 22 |
| 3.3   | Ominaispyörimisnopeus             | 23 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.4   | Hydraulinen hyötysuhde  | 24 |
| 3.5   | Kavitointi  | 24 |
| 3.6   | Siiven kehänopeus   | 25 |
| 3.7   | Veden läpivirtausnopeus potkurissa                            | 25 |
| 3.8   | Johtosiivet ja potkuri  | 26 |
| 4     | TURBIININ OSAT  | 28 |
| 4.1   | Akseliston suunnittelu  | 28 |
| 4.1.1 | Akselien mitoitus   | 28 |
| 4.1.2 | Akselien linjaus  | 28 |
| 4.1.3 | Vaihdelaatikko  | 29 |
| 4.2   | Generaattori  | 29 |
| 4.3   | Vierintälaakeroinnin suunnittelu                              | 29 |
| 4.3.1 | Laakerointi   | 29 |
| 4.3.2 | Laakeroinnin kestoiän mitoitus                                | 30 |
| 4.3.3 | Laakeripesän suunnittelu                                      | 30 |
| 4.4   | Tiivistyksen suunnittelu                                      | 31 |
| 4.4.1 | Tiivistys   | 31 |
| 4.4.2 | Staattisten tiivisteiden suunnittelu                          | 31 |
| 4.4.3 | Laakereiden tiivisteiden suunnittelu                          | 31 |
| 4.5   | Runkorakenne  | 32 |
| 5     | PIENVESITURBIINIEN KÄYTTÖMAHDOLLISUUKSIA                      | 34 |
| 5.1   | Vesiturbiinityyppien toiminta                                 | 34 |
| 5.2   | Pienvesivoimaloiden turbiinityypit                            | 35 |
| 5.3   | Sähköenergia viemäriverkostosta                               | 35 |
| 5.4   | Sopiva turbiinityyppi viemäriverkoston                        | 36 |
| 5.5   | Kannattavuuslaskelma turbiinin asentamisesta viemäriverkoston | 36 |
| 5.6   | Turbiinin sähkötehon määrittäminen                            | 38 |
| 5.7   | Turbiinin fyysinen koko                                       | 39 |
| 5.8   | Turbiinin asennuksessa viemäriverkoston ilmenevät ongelmat    | 40 |
| 5.9   | Turbiinin asennus Utista tulevalta veden runkolinjalle        | 41 |
| 6     | YHTEENVETO  | 42 |
|       | LÄHTEET   | 43 |

## JOHDANTO

Tämä työ on tehty Kymenlaakson ammattikorkeakoululle turbiinien tutkimushanketta varten, jossa selvitetään vesiturbiinien soveltuvuutta viemäriputkiin ja veden tulorunkoputkiin. Tässä työssä on käyty läpi yleiset pienen Kaplan-turbiinin suunnittelemiseen liittyvät asiat läpi. Työ perustuu pitkälti ammattiosaamiseen ja kirjallisuuden tietolähteisiin. Pienvesivoimalla tarkoitetaan laitteistoja, joiden teho on vähintään 20 kW ja enintään 1 MW.

Työssä on selvitetty turbiinin eri osa-alueiden merkitykset voimalaitokselle sekä suunnitteluohje pienvesiturbiinin suunnittelemiseksi. Mukana on selvitystä koneiden lähtömittoja määräävästä hydrodynamiikan suunnittelukaavoista sekä itse koneen suunnittelussa tarvittavista tiedoista.

Jotta pienvesivoimasta saisi kannattavaa on syytä sijoittaa koneet jo olemassa oleviin betonirakenteisiin esimerkiksi vanhojen myllyjen rakenteisiin ja vanhempien vesiturbiinien tilalle paremman hyötysuhteen saavuttamiseksi. Koneiden sijoituspaikkojen muodot vaihtelevat maaston ja erilaisten suunnitelmien mukaan, mutta tietyt peruseräatteen ovat jokaisessa laitoksessa. Itse turbiinien ulkomuodot vaihtelevat käytettävän turbiinityypin ja veden putouskorkeuden ja vesimäärän mukaan. Lisäksi yhtiöiden valikoimassa on erilaisia turbiinityyppejä vesimäärää säättävistä koneista kiinteään vesimäärän koneisiin. Tässä työssä on annettu perusohjeet pienten Kaplan-turbiinien suunnitteluun eikä ole paneuduttu niinkään tarkkoihin mittadetaljeihin esimerkiksi jonkun tietyn projektin mukaan.

Tässä työssä on myös tutkittu turbiinien soveltuvuutta viemärivesiputkiin ja veden tulorunkolinjaan. On laskettu muun muassa turbiinien investoinnin hintoja sekä selvitetty mahdollinen energiantuotantopotentiaali. Molemmista on laskelmat myöhemmin lopputyössä.

Vesivoiman tuotanto oheisissa kohteissa lisäisi veden tuottamaa kokonaissähköenergiaa energiamarkkinoilla, jos laitokset vaan saataisiin kannattavasti tehtyä. Työn mukana tulevilla laskelmilla laitosten potentiaalinen teettäjä voi arvioida projektien mielekkyyttä taloudellisessa mielessä.

# 1 YLEISTÄ VESIVOIMASTA

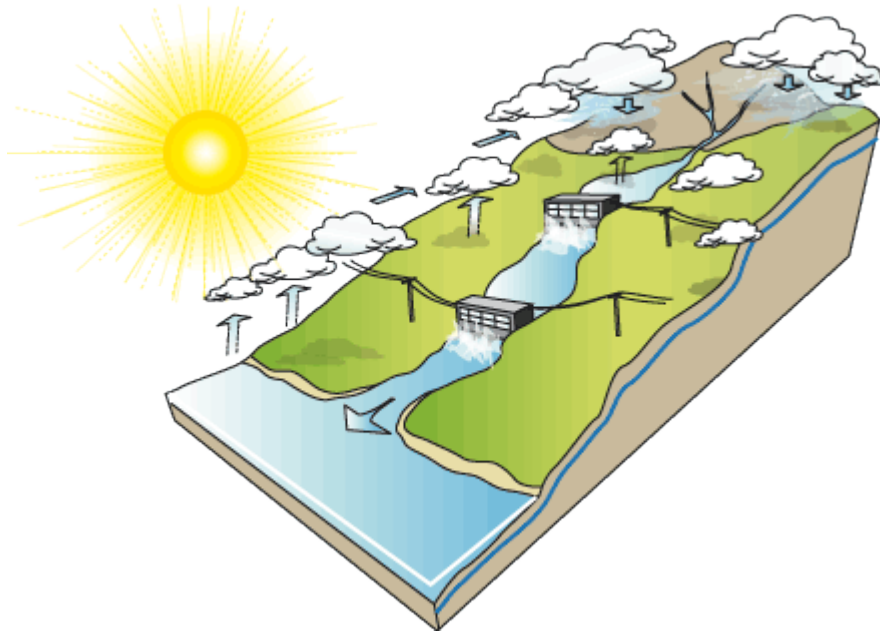
## 1.1 Toimintaperiaate

Veden kautta saatava energia perustuu veden kiertokulkuun ja se on uusiutuvaa energiaa. Eli vettä haihtuu koko ajan vesistöistä taivaalle ja se sataa jatkuvasti maahan uudemman kerran. Seitsemän prosenttia maailman energiasta tuotetaan vesivoimalla. (Hellgren 1999, 26).

Voimalaitoksissa veden tuottama energia perustuu vedessä olevaan potentiaalienergi-  
aan, jossa laitoksen yläveden pinta on ylempänä ja vesi virtaa voimalaitoksen läpi alaveteen muuttuen turbiinin siivistöissä nopeusenergiaksi, tämä saa turbiinin potkurin pyörimään ja tuottamaan mekaanista energiaa. Generaattorissa mekaaninen energia muuntuu sähköenergiaksi.

Kanavien ja patojen avulla muodostetaan vesivarasto ja kohdistetaan veden putousenergia tiettyyn paikkaan, jossa vesi virtaa voimalaitoksen läpi. Veden liike-energiaa kuluu pyörteisiin ja kuohuihin, jotka kehittävät lämpöä, joten voimalaitoksen rakenteet täytyy muokata mahdollisimman jouheviksi veden virtausta ajatellen (Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus 1981, 5)

Sähköenergia virtaa turbiinista sähkökeskukselle, josta se johdetaan muuntajassa korkeajännitteiseksi ja sen jälkeen sitä kautta valtakunnan verkkoon. Tästä syystä olisi hyvä asia, jos laitoksen sijainti olisi lähellä jo rakennettuja sähköverkkoja.



Kuva 1. Vesivoiman kiertokulku (Kemijoki, 4.5.2014)

## 1.2 Vesivoiman määrä Suomessa

Sähköenergiaa tuotetaan Suomessa vuosittain yhteensä 68,2 TWh. Tästä vesivoiman osuus on 18,7 % eli yhteensä noin 12,8 TWh. Tämä tosin vaihtelee vuosittaisten sateiden määrän mukaan pohjoismaissa. (Energiateollisuus, 4.5.2014)

Ruotsissa sekä Norjassa on valtava määrä vesivoimalaitoksia, koska seuduilla on paljon korkeuseroja ja isoja vesialtaita. Suomessa on yrityksiä, jotka tuottavat sähköä noin 120 kappaletta ja voimalaitoksia noin 400, joista vesivoimalaitoksia on yli puolet. (Energiateollisuus, 4.5.2014)

Tämä antaa hyvät mahdollisuudet käyttää vesivoimaa niin sanottuna säätövoimana, jossa vesivoimaa käytetään, kun on kulutushuiput energian tuotannossa. Suurten altaiden avulla voidaan säilöä vettä ja käyttää sitä silloin, kun se on taloudellisesti ja käytännöllisesti järkevää.

## 1.3 Pienvesivoiman osuus vesivoimasta

Pienvesivoima, jota myös minivesivoimaksi yleisesti kutsutaan tarkoittaa voimalaitoksia, joiden teho on alle 1 MW. Suomessa on 67 kpl minivesivoimalaitoksia ja tuotetun sähkön osuus on alle 1 % koko sähköntuotannosta. (Motiva, 4.5.2014)



Silti kiinnostus minivesivoimaa kohti on kasvussa, johtuen päästöttömästä energiantuotantomuodosta, koska fossiilisia polttoaineita ei tarvita. Lisäksi monesti minivesivoimaa varten on jo rakennettu olemassa olevat laitosrakenteet, joihin uusien koneiden sijoittelu on mahdollista. Tällaisia paikkoja ovat vanhat myllyt sekä vanhat vesivoimalaitokset, joihin pitäisi lisätä uudet koneet paremman hyötysuhteen takia. Näissä paikoissa muutokset ympäristöön olisivat pieniä, johtuen jo rakennetuista padoista ja laitoksista.

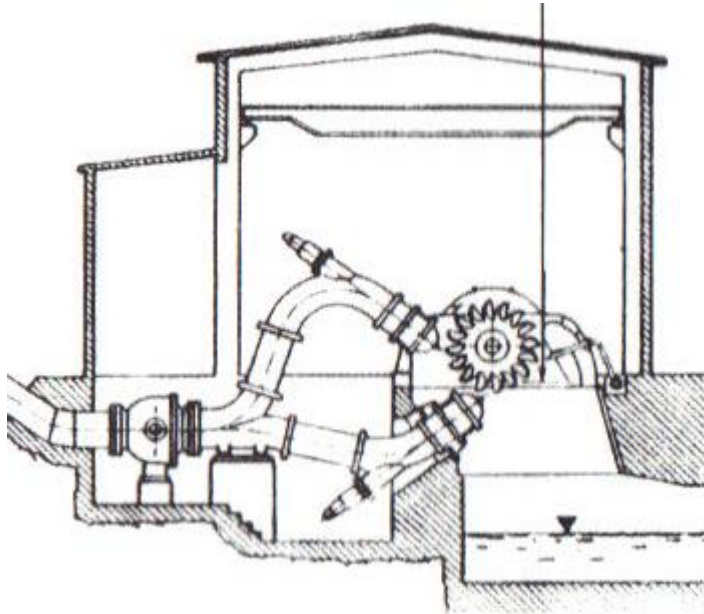
Suomessa on jäljellä suojelemattomissa vesistöissä vesivoimapotentiaalia noin 663 MW ja 2352 GWh/a, josta pienvesivoiman osuus on noin 144 MW ja jonka vuosituotanto on noin 1021 GWh/a. Arviot käyttämättömästä potentiaalista heittelevät eri tutkimuksissa jonkin verran. Taloudellisesti kannattavia paikkoja on vuoteen 2020 mennessä noin 22 - 75 MW. (Motiva, 4.5.2014)

## 1.4 Vesiturbiinit

### 1.4.1 Pelton-turbiini

Toiselta nimeltään Pelton-turbiinit ovat tasapaine- eli aktioturbiineja ja niitä käytetään vaakasuorassa asennossa. Se soveltuu lähinnä suuriin putouskorkeuksiin noin 2000 m:iin ja pienempiin putouksiin 100 m:iin ja pienille vesimäärille. Juoksupyörä sijaitsee kokonaan alavedenpinnan yläpuolella. Paine-energia, joka aiheutuu putouskorkeudesta, suuttimen muotoisessa johtolaitteessa muutetaan kokonaan nopeusenergiaksi. Juoksupyörän kauhoihin kohdistetaan suurinopeuksinen vesisuihku, ja veden nopeusenergia muuttuu momentiksi, joka pyörittää akselia. Vettä johdetaan vain osalle juoksupyörän kehää. (Huhtinen – Korhonen – Pimiä – Urpalainen 2008, 267)

Lisäämällä suuttimia tai käyttämällä kahta pyörää samalla akselilla, turbiini voidaan tehdä nopeammaksi. Pieniinkin putouksiin on mahdollista sijoittaa Pelton-turbiini, mutta tämä ei ole yleensä taloudellisesti kannattavaa, koska suhteellinen putoushukka kasvaa johtuen juoksupyörän korkeasta sijoituksesta ja generaattori tulee suureksi johtuen koneen hitaudesta. (Takkinen 1994, 22)



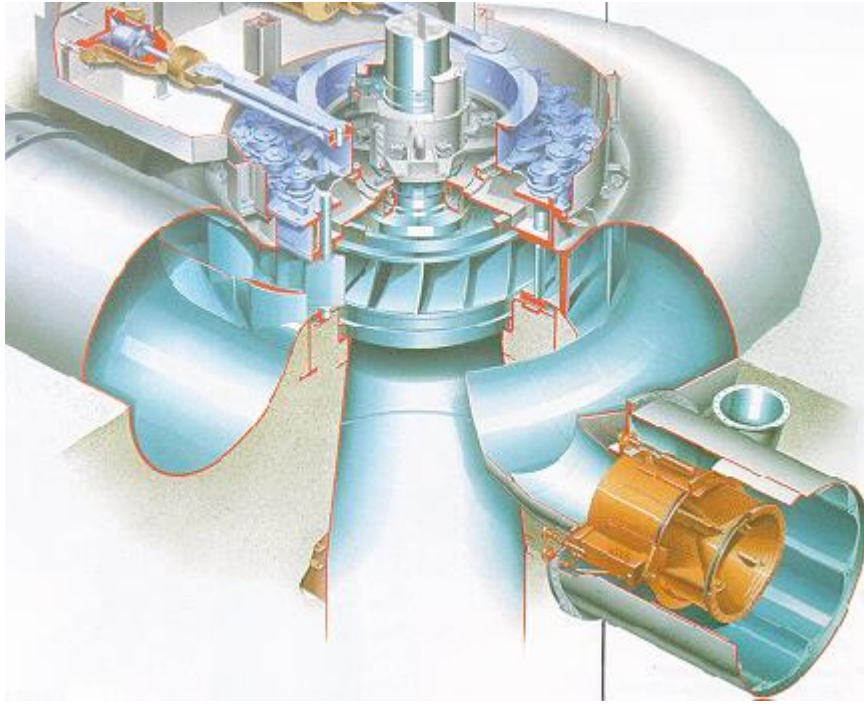
Kuva 2. Pelton-turbiini. (Huhtinen ym. 2008, 267)

#### 1.4.2 Francis-turbiini

Francis-turbiinit soveltuvat putoukorkkeuksille 5-700 metriä. Uudemmat Francis-turbiinit Suomessa ovat pieniä. Niissä on ollut teho noin 8 MW ja vesimäärä noin 20 m<sup>3</sup>/s. (Huhtinen ym. 2008, 268)

Käyttöalueeltaan laajimmat sekä kokoon että putoukorkkeuteen nähden ovat Francis-turbiinit. Esimerkkinä suurimmat koneet ovat noin 700 MW (Itaipu) ja pienimmät koneet ovat muutama sata kilowattia. Turbiineja voidaan tehdä sekä vaaka-, että pysty-akselisina. Parhaiten Francis-turbiini soveltuu käytettäväksi suurissa turbiineissa. (Takkinen 1994, 24)

Juoksupyörässä on 10 - 30 kappaletta kaksoiskaarevia siipiä, jotka on kiinnitetty potkuriin ulkokehältä. Vesi tulee juoksupyörään säteen suuntaisesti ja kaartuu siivissä akselin suuntaiseksi. Kun säädetään johtosiipiä, niin tulokulma ei pysy parhaana mahdollisena ja tästä syystä Francis-turbiineja ei käytetä pienissä vesivoimalaitoksissa, koska hyötysuhteen täytyy olla hyvä vaihtelevilla virtaamilla. (Takkinen 1994, 24)



Kuva 3. Rakennekuva Francis-turbiinista (Chalmers, 4.5.2014)

#### 1.4.3 Kaplan-turbiini

Suomen oloihin soveltuvat hyvin Kaplan-turbiinit. Koska niiden sovellutusalue on laaja, ovat ne yleisesti käytössä. Niitä voi sijoittaa paikkoihin, joissa putouskorkeudet vaihtelevat 2 metristä 70 metriin. Kaplan-turbiinissa on säädettävät johtosiivet ja potkurin siivet, joilla veden virtauksen määrää voidaan säätää sekä hakea veden tulokulma oikeaksi potkurin siivelle. Materiaalina käytetään ruostumatonta terästä. Siivet ovat pronssiholkeissa navassa ja napa on täynnä öljyä voitelemisen varmistamiseksi. (Huhtinen ym. 2008, 269)

Johtosiivillä voidaan sulkea virtaustie, joten ne toimivat ikään kuin turbiinin sulkuventtiilinä. Voimalaitoksen potentiaalienergia muuttuu liike-energiaksi potkurin siivissä. (Takkinen 1994, 25)

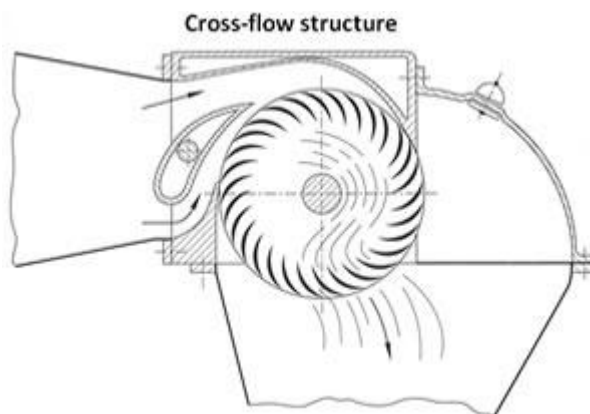
Turbiini voi olla sekä pysty- ja vaaka-akselinen. Jos turbiinissa on kiinteät johtosiivet, sanotaan sitä silloin semi-Kaplaniksi. Juuri tällaisia turbiineja Waterpumps WP Oy:n turbiinit pääasiassa ovat. Niissä turbiinin sulkulaitteena toimii joko läppäventtiili tai turbiinissa sijaitseva sulkuluukku.

#### 1.4.4 Crossflow-turbiini

Kammioon asennetusta vaaka-akselisesta roottori (sylinteri) muodostuu Cross-flow turbiini. Kammiossa olevan ohjaussiiven avulla johdetaan roottoriin vesi tasaisena virtauksena. Turbiinin sulku- ja säätölaitteena toimii ohjaussiipi. (Takkinen 1994, 31)

Vesi poistuu roottorin puoleisen kierroksen jälkeen sen sisältä, kun se on virrannut turbiinissa roottorisiipien läpi kohti roottorin keskustaa. Vesivirtaus, joka poistuu ulospäin, puhdistaa keskipakovoiman avulla epäpuhtaudet, jotka ovat tarttuneet roottorin siipiin. Generaattorille voima välitetään välivaihteen tai hihnan avulla. (Takkinen 1994, 31)

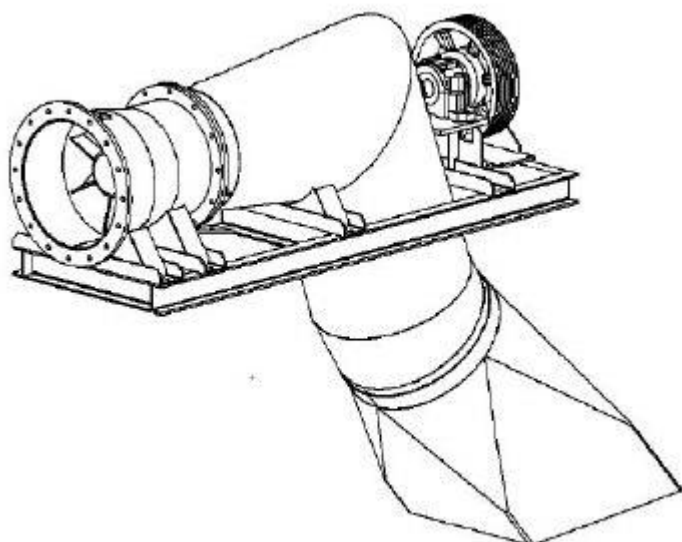
Sovellutusalue on laaja tälle turbiinimallille. Mataliin ja virtaamaltaan vaihteleviin putouksiin se sopii hyvin. Se on mahdollista asentaa putoukorkkeuksiin yhdestä 200 metriin. Sen käyttöä Suomessa on rajoittanut kyky kestää talvisia ominaisuuksia. (Takkinen 1994, 32)



Kuva 4. Crossflow-turbiinin idea. (Tanasui, 4.5.2014)

#### 1.4.5 Kiinteäsiipinen putkiturbiini

Kiinteäsiipisissä putkiturbiineissa on kiinteät johtosiivet ja potkurin siivet. Se soveltuu hyvin mataliin putouksiin. Kolmella erikokoisella turbiinilla saadaan aikaan jo seitsemän erilaista virtaaman arvoa. Putkiturbiineissa sulkulaitteena toimii joko läppäventtiili tai sitten turbiinissa kiinteästi oleva sulkuluukku. Generaattorin voidaan sijoittaa turbiinin sisälle samalle akselille kuin potkuri. Veden virtaus on putkiturbiinissa aksiaalinen.



Kuva 5. Putkiturbiini. (Pienvesivoima, 4.5.2014)

## 2 VOIMALAITOSRAKENTEET

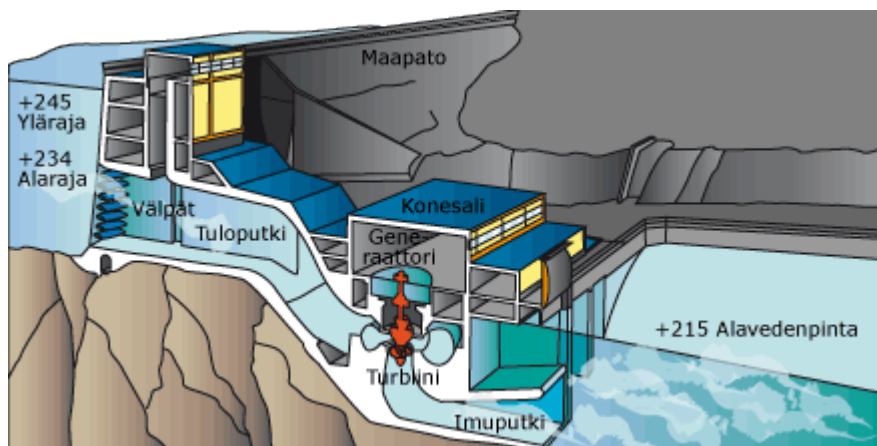
### 2.1 Betonirakenteet

Voimalaitoksen betonirakenteet koostuvat voimalaitoksen patorakennelmista ja itse päärakennuksesta, johon turbiini sijoitetaan. Voimalaitoksen muodot muodostuvat maaston, veden pinnankorkeuden ja käytettävien laitteistojen mukaan.

#### 2.1.1 Voimalaitosrakennus

Voimalaitos tarvitsee turbiinin apulaitteille, generaattorille, sähkökeskukselle ja automaatiolaitteille, tilan ja tästä syystä voimalaitokselle on suunniteltava erillinen rakennus, johon nämä laitteet voidaan sijoittaa. Tila voi olla tehty betonista tai puusta, mutta esimerkiksi generaattorin pitäisi sijaita betonisen alustan päällä. Rakennus voi olla rakennettuna voimalaitoksen päälle tai viereen. On syytä kiinnittää huomiota, että eri osien kuljetus laitokselle tarvitsee isot tilat ja turbiinikin olisi pystyttävä nostamaan paikalleen. Mitä pienemmät tilat silti onnistutaan rakentamaan kaikki käytännön asiat huomioon ottaen, niin sitä pienemmäksi tulevat lopulliset kustannukset rakennuksesta.

Voimalaitosrakennus voidaan jakaa kolmeen osaan: vesitiet, konesali sekä koneisto- ja apulaitostilat. Koneistojen lukumäärä ja suuruus sekä putouskorkeus vaikuttavat koneaseman kokoon. Omaan monoliittiinsa sijoitetaan jokainen koneisto monen koneiston laitoksessa. Tuloputki, spiraali ja imuputki muodostavat vesitien. Se tehdään pääosin betonista, mutta putket ovat terästä. (Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus 1981, 244)



Kuva 6. Läpileikkaus voimalaitoksesta. (Kemijoki, 4.5.2014)

### 2.1.2 Padot

Teräsbetonista tai maasta tehdään voimalaitosten pysyvät patorakenteet. Äskeisessä maalla tarkoitetaan maalajeja, jotka saadaan maaperästä tai louhimalla kallioperästä saatavaa materiaalia. (Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus 1981, 243)

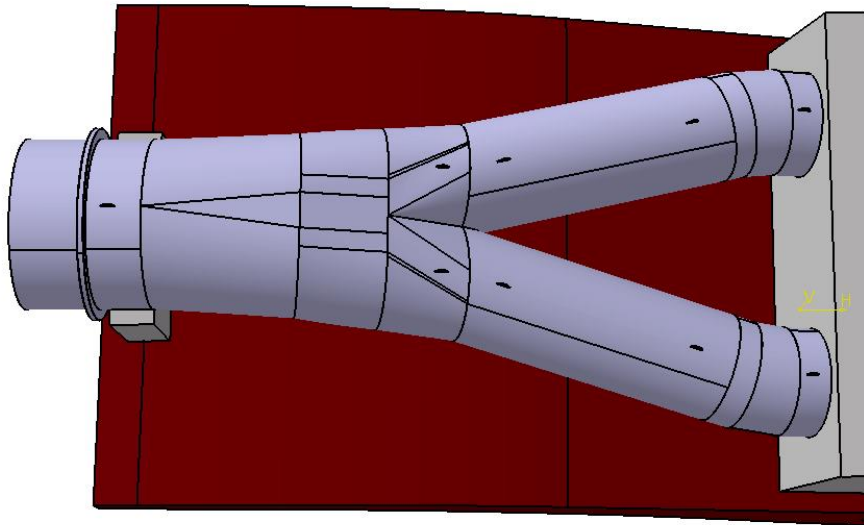
Topografian ja käyttötavan lisäksi huomioon on otettava pohjaolosuhteet voimalaitoksen tyyppiä ja sijoitusta varten. Kallion varaan olisi hyvä perustaa laitokset. Tämä on mahdollista useimmiten, koska irtomaapeite on ohut yleensä Suomessa. (Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus 1981, 243)

Patojen mitoitusta ja suunnittelua varten on seuraavanlaisia perusteita: pato ei saa liukua, eikä kaatua, sallittuja jännityksiä ei ylitetä betonissa ja perustassa ja perustan on oltava padossa tiivis. (Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus 1981, 247)

Gravitaatiopadot, joissa padon oma paino joko yksinään tai yhdessä johtaa veden paineen alaspäin padon perustalle ovat Suomessa yleisimpiä. Ne jaetaan seuraaviin päätyyppeihin: Massiiviset padot, lamellipadot ja laattapadot. (Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus 1981, 247)

## 2.2 Tuloputki

Tuloputki on laitoksen koneille johtava vesiputki, joka on useimmiten tehty normaalia rakenneteräksestä ja maalattu. Tuloputken pituus ja muoto määräytyvät laitoksen koneaseman paikasta laitoksen alkupään patomuurien sijaintiin nähden. Jos turbiinikoneistoja on monta, haarautuu tuloputki moneen osaan ja on niin sanottu housuputki tällöin. Tuloputken tehtävä on tasata virtaus turbiinikoneistoille.



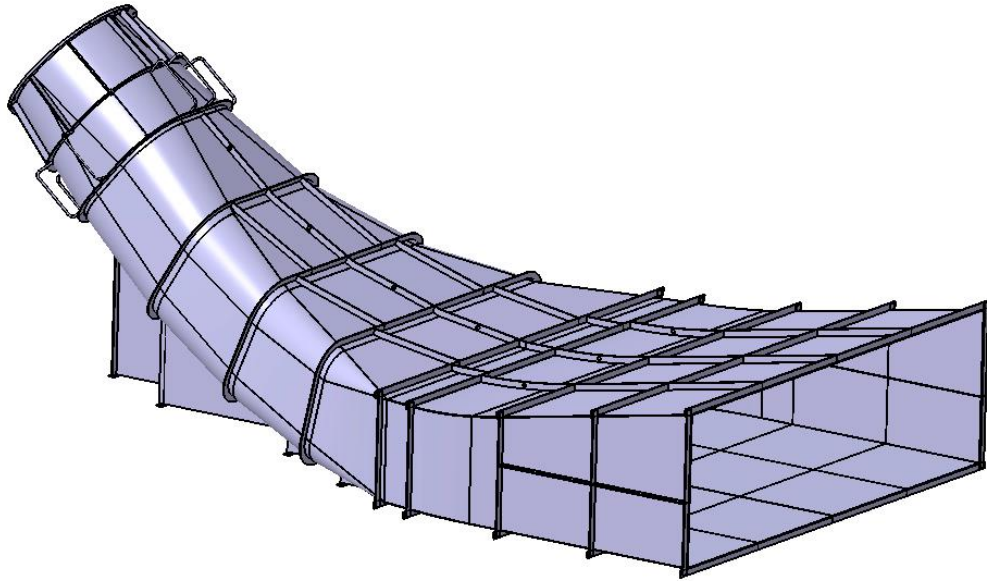
Kuva 7. Voimalaitokselle vettä johtava tuloputki.

### 2.3 Imuputki

Imuputki on turbiinin jälkeinen putki, jonka tehtävä on tehdä alipainetta potkurin jälkeen, jotta voimalaitoksesta saadaan hyödyksi koko kahden pinnan välinen pinnan korkeusero. Imuputki tehdään joko rakenneteräksestä ja maalataan tai sitten se tehdään ruostumattomasta teräksestä. Imuputken malli vaihtelee voimalaitoksella olevan tilan mukaan. Normaali malli on kartion muotoinen imuputki, joka aukeaa tietyllä avauskulmalla. Tarpeen vaatiessa voidaan tehdä jonkinlaista muutosta ympyrästä suorakaiteen muotoon tai sitten voidaan tehdä mutkaputki, jossa vesi tekee 90 asteen mutkan imuputkessa.

Vesi hidastuu imuputkessa ja virtaa tasaisesti ulos turbiinista. Tarkoitus olisi, että vesi pysyisi kiinni imuputken seinämissä. Tätä varten imuputken muotoilu on erityisen tärkeää. Vesi sisältää poistuessaan imuputkesta mahdollisimman vähän liike-energiaa. Imuputken täytyy olla koko ajan täynnä vettä, jotta imutapahtuma olisi mahdollinen.





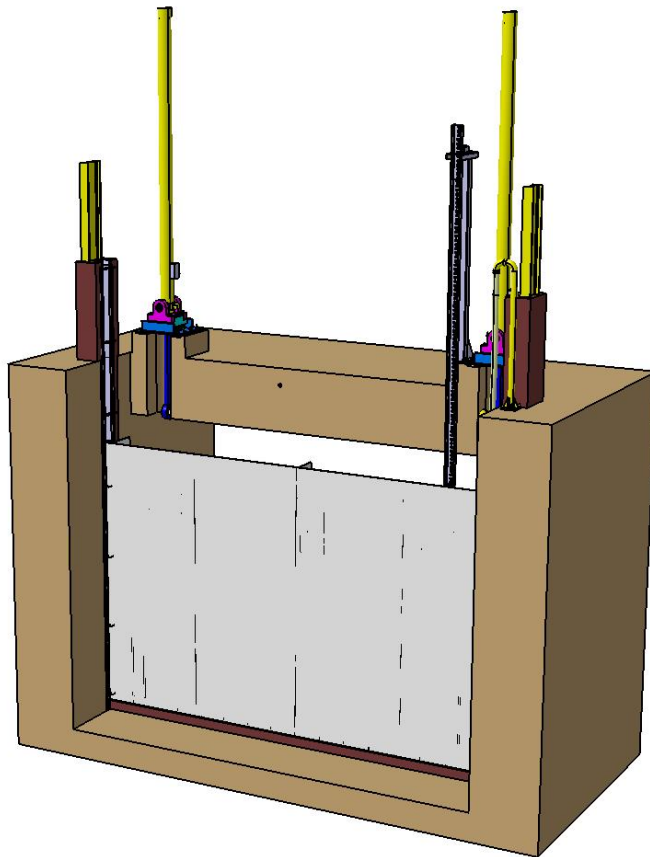
Kuva 8. Voimalaitoksen imuputki

## 2.4 Tulvaluukku

Voimalaitoksen juoksutuksen eli vesimäärän säätöä voidaan hoitaa myös tulvaluukuilla, joita on monen mallisia. On niin sanottuja segmenttiluukkuja, jotka ovat segmentin muotoisia ja aisojen avulla ne tukeutuvat sivumuureihin. Niissä on etuna se, että vedenpaineen resultantti, joka kohdistuu luukkuun, kulkee tukilaakereiden kautta. Suljettaessa ja avattaessa vain kitkat ja hydrodynaamiset voimat joudutaan voittamaan. (Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus 1981, 159)

On myös tavallisia suorakaiteen muotoisia luukkuja, jotka ovat jäykistettyjä levyillä ja toimivat hydraulisylintereiden avulla. Niihin saa myös lämmityksen jäätymisenestoa varten.

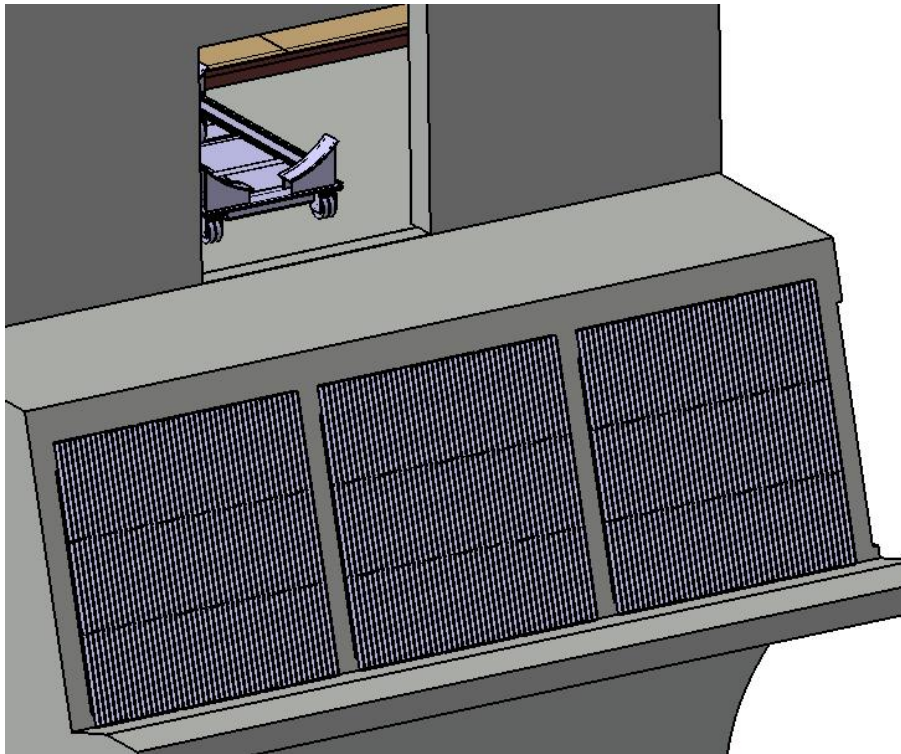
Talviolosuhteissa tarvitaan myös varmaa toimintaa. Pienijännitteisellä sähkövirralla johdetaan lämpöä segmentin pieli- ja kynnysteräksiin. Rungon sisätila varustetaan sähkölämmityksellä ja rungon alaveden puolella tehdään lämpövuoraus. Jään muodostuminen kilpilevyn pintaan estetään näin. (Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus 1981, 159)



Kuva 9. Tulvaluukku ja hydraulisylinterit.

## 2.5 Välppä

Voimalaitoksen eteen täytyy laittaa suoja roskia vastaan. Välppä on terässäleikkö, joka tehdään lattaraudasta tai pisara-profiilin muotoisista teräslatoista ja niiden väli toisiinsa nähden on noin 20 - 100 mm. Materiaalina käytetään rakenneterästä maalauksen kanssa tai ruostumatonta terästä. Välppä täytyy mitoittaa kestämään koko alueelle tuleva vedenpaine tukkeutumista vastaan. Jäät voivat myös aiheuttaa tämän. Välppä täytyy myös suunnitella siten, että sen voi helposti puhdistaa roskista tai että siihen voidaan asentaa erillinen välppäpuhdistaja.



Kuva 10. Voimalaitoksen edessä olevat välppälohkot.

## 2.6 Vesitien sulkulaitteet

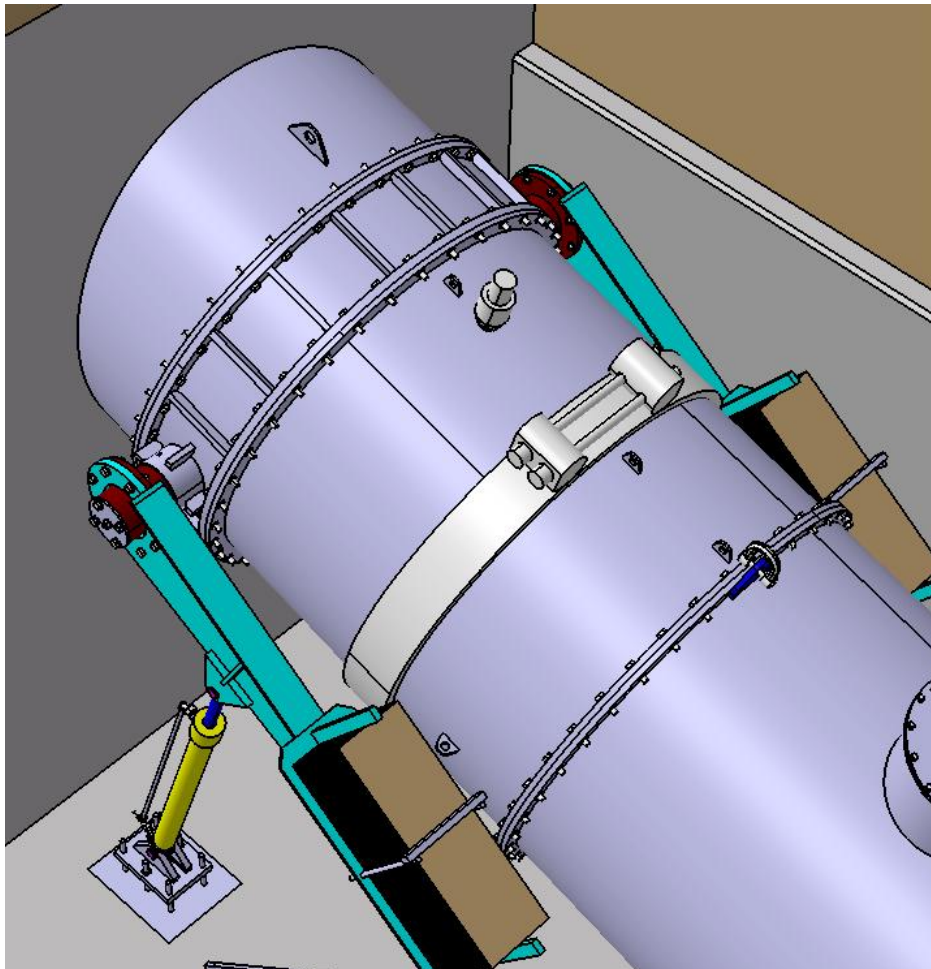
Vesitien sulkulaitteita voi olla monen mallisia, mutta niiden pääasiallinen tehtävä on sulkea veden tie turbiinille eri syistä. Näitä voivat olla turbiinin huoltotyöt tai jos halutaan pitää ylaveden pinta tietyssä pinnankorkeudessa.

### 2.6.1 Tuloputken sulkuluukku

Sulkuluukut ovat yleensä tasoluukkuja, jotka ovat varustettu pyörillä. Vesiteiden sulkemista tarvitaan huoltoja ja korjauksia varten sekä vuotohäviöiden välttämiseksi pitkien seisokkien aikana. Turbiinin ryntäystä varten luukut varustetaan toimimaan myös hätäsulkelaitteina, jolloin ne sulkeutuvat turbiinin valvontalaitteiston ohjaamina. Luukut on mitoitettava siten, että ne sulkeutuvat ilman ulkopuolista energiaa oman painonsa avulla. Painoa on oltava riittävästi, jotta voitetaan veden virtauksesta ja kitkoisista aiheutuvat voimat. Voimalaitoksen eteen tehdään betonista väliseiniä, jolloin luukuista saadaan kapeampia. Tuloputken luukut sijoitetaan sisätiloihin, jotta ne eivät jäätyisi. (Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus 1981, 157)

## 2.6.2 Lämpäventtiili

Lämpäventtiili on pyöreän muotoinen läppä putkessa, joka sylinterin tai sähkömoottorin avulla saadaan kääntymään kiinniasentoon putkessa. Se täytyy mitoittaa siten, että se jaksaa mennä kiinni myös sellaisessa tilanteessa, jossa turbiini ryntää ja vesi pääsee virtaamaan omalla painollaan putkessa, jotta turbiini ei jarruta vettä. Lämpä kannattaa tehdä ruostumattomasta teräksestä valamalla tai hitsattuna teräsrakenteena. Lämpä täytyy suunnitella täysin tiiviiksi, jotta vesi ei pääse sen läpi kiinnitilanteessa. Tämä mahdollistaa huoltojen ja korjauksien tekemisen. Lämpän täytyy olla myös sellainen, että se menee itsestään kiinni, kun laitos menee pois verkosta eli siinä täytyy olla jonkinlaiset vastapainot hoitamaan kyseinen tilanne. Lisäksi se kannattaa laakeroida liukulaakereilla, jotta ne ottaisivat valtavat pintapaineet.



Kuva 11. Lämpäventtiili ja sen avaamista hoitelevat varret vastapainoineen.

### 2.6.3 Turbiinin sulkulaite

Turbiinissa itsessään voi olla myös jonkinlainen veden turbiiniin pääsyn estävä sulkumekanismi. Se voidaan toteuttaa esimerkiksi veden määrää säätävillä johtosiivillä. Ne menevät sulkeutuessaan limittäin toistensa päälle niin, että ne ovat muotoiltu tiivistämään välit kokonaan. Hydraulisyylinterillä saadaan kyseinen operaatio tehtyä.

Lisäksi on mahdollista varustaa turbiini erillisellä sulkuluukulla, joka on kiinni turbiinissa ja ohjautuu hydraulisyylinterillä auki ja menee veden paineesta itsestään kiinni, kun turbiini sulkeutuu.

### 2.6.4 Settiurat

Vesitie voidaan sulkea myös settiuriin laitettavilla puu- tai teräspalkeilla. Betonikynnykseen on valettu L-palkki, jota vasten settien toinen pää tulee ja toinen pää nojaa betonisillan kanteen. Setit täytyy olla mitoitettu kestäämään koko vesitien sulkemisesta aiheutuvaan vesipaineeseen. Ne on mahdollista asentaa käsin tai erillisellä nostolaitteistolla.

### 2.6.5 Imuputken sulkuluukku

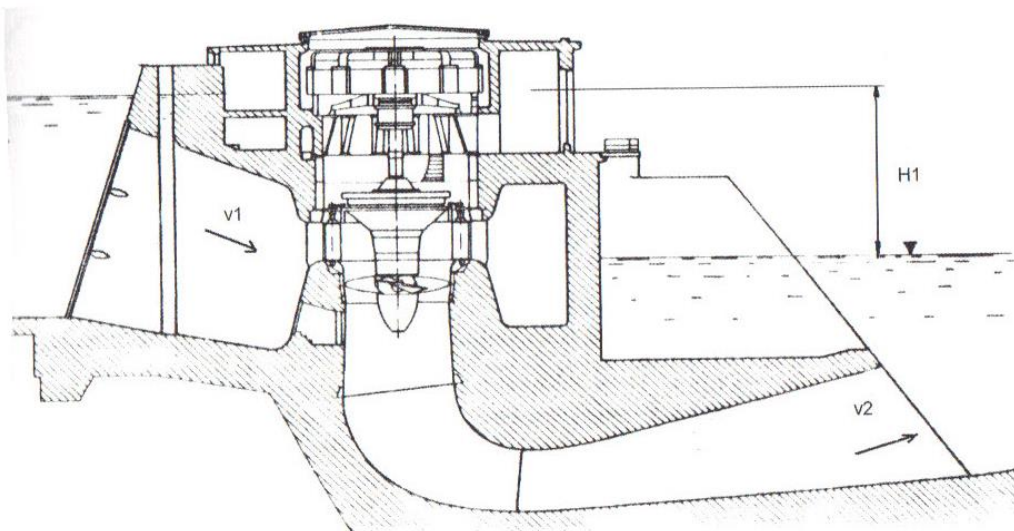
Imuputken sulkemiseksi käytetään myös tasoluukkua, jota käytetään huolto- ja korjaustilanteissa, ja se lasketaan silloin seisovaan veteen. (Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus 1981, 158)

Imuputkessa voi olla myös kiinnitettynä pyöreän muotoinen sulkuluukku, joka sulkeutuu painovoimaisesti, kun turbiinia ei ajeta. Avattaessa käytetään hydraulisyylinteriä, jotta se saadaan auki.

### 3 TURBIININ HYDRODYNAMIIKKA

#### 3.1 Putouskorkeus

Veden putouskorkeus lasketaan voimalaitoksen ylaveden ja alaveden välisestä korkeuserosta. Putouskorkeutta merkitään kirjaimella  $H$ . Monesti turbiinin potkuripesä on hieman alaveden yläpuolella, jolloin siihen vaikuttaa vain ylavedestä potkuriin saakka vesipaine. Imuputken avulla saadaan kuitenkin käytettyä koko putouskorkeus hyödyksi, koska se tekee alipaineen potkurin alapuolelle. Häviöt pienentävät putouskorkeutta. Esimerkiksi välppään hukkuu jonkin verran energiaa, koska vesi joutuu menemään läpi pienten välppäarakosien välistä.



Kuva 12. Vesivoimalaitoksen putouskorkeus (Huhtinen ym. 2008 , 265)

#### 3.2 Vesivoimalaitoksen teho

Vesivoimalaitoksen teho voidaan laskea seuraavasta kaavasta, joka antaa tuloksen watteina. (Huhtinen ym. 2008, 265)

$$P = Q H \rho g \eta \quad (1)$$

jossa  $P = \text{Teho [W]}$

$Q$  = virtaavan veden vesimäärä [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$H$  = putouskorkeus [m]

$\rho$  = veden tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ , noin  $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ]

$g$  = painovoiman kiihtyvyys [ $\text{m}/\text{s}^2$ , noin  $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$ ]

$\eta$  = turbiinin, imuputken ja generaattorin hyötysuhde

Eli laitoksen tehoa voidaan säätää vesimäärää säätelemällä. Myös koneiden hyötysuh-teita kannattaa yrittää nostaa maksimiinsa. Putouskorkeuden arvo täytyy pitää rajoissa, jotka on säädetty laitokselle.

Laitoksen teho voidaan laskea myös Eulerin turbiiniyhtälön perusteella (Perttula 1999, 101)

$$\Delta P = \Delta q_v \rho (c_{u1} u_1 - c_{u2} u_2) \quad (2)$$

jossa  $\Delta q_v$  = pieni osuus virtaamasta

$\Delta P$  =  $\Delta q_v$ :n tuottama teho

$c_{u1}$  = todellinen  $u_1$ :n suuntainen nopeus ennen juoksupyörää

$c_{u2}$  = todellinen  $u_2$ :n suuntainen nopeus ennen juoksupyörää

$u_1$  = juoksupyörän kehänopeus

$u_2$  = juoksupyörän kehänopeus

### 3.3 Ominaispyörimisnopeus

Ominaispyörimisnopeus on suhteellinen käsite eri turbiinityypeille ja putouskorkeu-den ja vesimäärän mukaan muuttuvana arvona. Sillä voidaan laskea ja määrittää tur-biinin todellinen pyörimisnopeus, koska suhteellisista pyörimisnopeuksista on saata-

vana erilaisia taulukoita. Pyörimisnopeus lasketaan seuraavasta kaavasta: (Huhtinen ym. 2008, 266)

$$n = \frac{n_s H^{0,75}}{\sqrt{Q}} \quad (3)$$

jossa  $n$  = todellinen pyörimisnopeus [rpm]

$n_s$  = suhteellinen pyörimisnopeus [rpm]

$Q$  = vesimäärä [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$H$  = putouskorkeus [m]

### 3.4 Hydraulinen hyötysuhde

Hydraulinen hyötysuhde koostuu turbiinin ja imuputken hyötysuhteesta. Imuputken hyötysuhde muodostuu imuputken virheettömyydestä ja siitä kuinka hyvin imu saadaan tehtyä potkurin alle. Imuputken hyötysuhde on parhaimmillaan noin 96 %.

Kaplan-turbiinin hyötysuhde taas koostuu vesiteiden jouhevuudesta ja potkurin ja johdosiipien välisistä muodoista toisiinsa nähden. Hyötysuhteeksi saadaan parhaimmillaan noin 90 %.

### 3.5 Kavitointi

Kaplan-tyyppisissä reaktioturbiineissa pyritään yhä suurempiin kierrosnopeuksiin turbiinin ja generaattorin pienentämiseksi. Tästä syystä pyritään sijoittamaan juoksupyörä alavedenpinnan alapuolelle, jottei veden paine, joka koskettaa juoksupyörää, missään tilanteessa johtaisi höyrykuplien syntymiseen, koska se alittaisi veden lämpötilaa vastaavan kylläisen höyryn paineen. Höyrykupla luhistuu äkkiä ja aiheuttaa siiven pintaan kohdistuvan voimakkaan vesi-iskun, kun se joutuu suuremman paineen alueelle. Tämä irrottaa oksidikerroksen, joka suojaa pintaa. Paine, joka syntyy on tuhansia baareja. Tätä ilmiötä kutsutaan kavitaatioksi. (Perttula 1999, 97)

Hapen vaikutuksesta paljastunut uusi metallipinta oksidoituu uudelleen. Uuden vesi-iskun vaikutuksesta tämä oksidikerros tuhoutuu taas uudelleen. Hyötysuhde laskee



tämän kavitaation seurauksena ja voi aiheuttaa suurenkin vaurion edetessään. Tästä syystä tulisi sijoittaa juoksupyörä mahdollisimman paljon alle alaveden pinnan kavitaatiovaaran takia. Dimensioiltaan suurempien turbiinien käyttö, joiden virtausnopeudet ja pyörimisnopeudet ovat pienempiä, on toinen vaihtoehto. Koon kasvattaminen ei teknisistä syistä onnistu rajattomasti Kaplan-turbiineilla. (Perttula 1999, 97)

### 3.6 Siiven kehänopeus

Jokaiselle turbiinin potkurille lasketaan tietty pyörimisnopeus turbiinin ominaispyörimisnopeuskaavalla. Siipi voidaan ajatella siten, että se on täynnä erilaisia pisteitä, ja jokaisen nopeus riippuu etäisyydestä potkurin keskiöön. Potkuri jaetaan kuitenkin normaalisti profileihin, jotka ovat tietyllä säteellä potkurin keskiöstä. Nopeudet saadaan laskettua kaavalla:

$$w = \pi \cdot 2 \cdot R \cdot n \quad (4)$$

jossa  $w$  = siiven nopeus tietyllä kohtaa  $R$  [m/s]

$R$  = etäisyys keskiöstä [m]

$n$  = potkurin pyörimisnopeus [1/s]

### 3.7 Veden läpivirtausnopeus potkurissa

Vesi virtaa turbiinin läpi joko vapaasti eli turbiini tällöin ryntää eikä jarruta vettä tai siten, että turbiini on kytkettynä verkkoon ja jarruttaa koko ajan veden virtausta eli ottaa siitä energiaa talteen. Turbiinin juoksupyörän siivet ovat säädetty tai tehty siten, että ne päästävät tietyn määrän vettä potkuripesän läpi koko ajan. Tästä muodostuu virtaama. Potkuripesän läpivirtausnopeus voidaan laskea kaavalla:

$$w = \frac{Q}{A} \quad (5)$$

jossa  $w$  = veden nopeus [m/s]

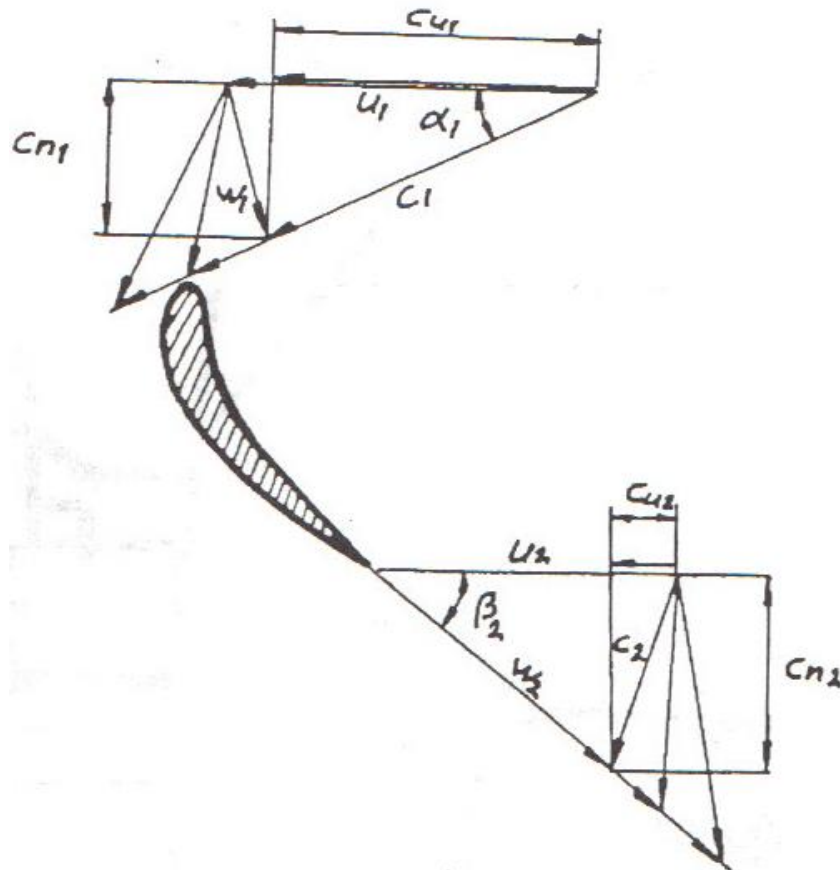
$Q$  = vesimäärä [m<sup>3</sup>/s]

$$A = \text{pinta-ala} [\text{m}^2]$$

Mitä paremmin juoksupyörän siivet on suunniteltu, sitä vähemmän vettä ne vievät halutun generaattoritehon aikaansaamiseksi.

### 3.8 Johtosiivet ja potkuri

Täysin säätyvissä Kaplan-turbiineissa turbiinin johtosiipien ja potkurin lapakulmien kulma-asemia voidaan säätää, jotta saadaan turbiini toimimaan hyvällä hyötysuhteella ja halutulla vesimäärällä. Jos siivet ovat kiinteät täytyy johtosiipien ja potkurien tulo- ja jättökulmat laskea. Tulo- ja jättökulmat lasketaan oheisen nopeuskolmioiden avulla jokaiselle potkurin ja johtosiiven eri säteiden profiilille.



Kuva 13. Nopeuskolmiot turbiinin juoksupyörässä. (Perttula, 102)

jossa  $c_{n1}$  = potkuripesän läpivirtausnopeus

$c_{n2}$  = potkuripesän läpivirtausnopeus

$c_1$  = veden todellinen nopeus ennen juoksupyörää

$c_2$  = veden todellinen nopeus juoksupyörän jälkeen

$c_{u1}$  = todellinen  $u_1$ :n suuntainen nopeus ennen juoksupyörää

$c_{u2}$  = todellinen  $u_2$ :n suuntainen nopeus ennen juoksupyörää

$u_1$  = juoksupyörän kehänopeus

$u_2$  = juoksupyörän kehänopeus

$w_1$  = veden suhteellinen nopeus ennen juoksupyörää

$w_2$  = veden suhteellinen nopeus juoksupyörän jälkeen

$\alpha_1$  = johtosiiven lähtökulma

$\beta_2$  = potkurin siiven lähtökulma

## 4 TURBIININ OSAT

### 4.1 Akseliston suunnittelu

Turbiinin akseli täytyy suunnitella siten, että siihen on mahdollista sijoittaa kaikki tiivisteet, laakerit ja potkuri sekä tarvittaessa generaattori. Vesi pyörittää potkuria ja akseli pyörittää generaattorin roottoria, joten akseliin kohdistuu vääntövoima ja se täytyy olla mitoitettu kestäämään tämä voima. Akseli on eri paksuinen eri kohdiltaan ja siinä on olakkeita, jotka vastaavat laakereihin ja tiivisteisiin ja eri turbiinin osiin, jotka ovat akselilla. Akseli tehdään normaalisti kestävämmästä rakenneteräksestä S355J2G3 tai jostain kestävästä akseliteräksestä.

#### 4.1.1 Akselien mitoitus

Akseli mitoitetaan oheisella kaavalla

$$\tau = \frac{M}{W} \quad (6)$$

jossa  $\tau$  = vääntöjännitys [ $\text{N/mm}^2$ ]

$M$  = akseliin aiheutuva maksimimomentti [ $\text{Nmm}$ ]

$W$  = vääntövastus [ $\text{mm}^3$ ]

On myös syytä käyttää jonkinlaisia varmuuskertoimia, jotta akseli todella kestäisi vaikuttavan momentin.

#### 4.1.2 Akselien linjaus

Jos turbiinin potkuri ja generaattori ovat eri akselilla, tarvitaan kytkin tähän väliin, joka kytkee turbiinin akselin ja generaattorin akselin yhteen. Ne pitäisi olla mahdollisimman tarkasti samansuuntaisia, jottei pääsisi esiintymään jännityksiä kahden eri akselin välillä. Linjausta voi mitata esimerkiksi laseriin perustuvalla akselinlinjausjärjestelmällä. Hyvin linjattu kone suojaa konetta ja parantaa tuotteen laatua, kun värähtelyt vähenevät huomattavasti.

#### 4.1.3 Vaihdelaatikko

Turbiinin pyörintänopeus mitoitetaan potkurin perusteella ja jos ei ole saatavilla saman nopeuksista generaattoria huomioiden tietenkin generaattorin mahdolliset pyörintänopeudet niin tällöin tarvitaan vaihdelaatikko turbiinin ja generaattorin väliin. Vaihdelaatikolla siirretään tehoa, sekä muunnetaan pyörimisnopeuden ja momentin ja välistä suhdetta. Sisääntuloakselin ja ulostuloakselin välinen välityssuhde voidaan valita vaihdelaatikon avulla.

#### 4.2 Generaattori

Generaattori on pyörivä sähköinen laite, joka muuntaa potkuri aiheuttavan pyörimismomentin sähköksi. Sähköinen ilmiö on nimeltään induktio, jossa magneettikenttä pyörii silmukoiden läpi ja tuottaa sähköä. (Internetix, 4.5.2014)

Generaattori täytyy olla hyvin tuettu, koska roottorin ja staattorin välillä on voimavaihtus magneettikenttien takia, jossa roottori pyrkii pyörittämään staattoria. Siis roottori täytyy olla tukevasti laakeroitu ja kiinni laakeripesissä ja taas staattori täytyy olla puristusliitoksella putkessa ja putki tuettu hyvin kiinni.

Monesti generaattori valitaan 3000 kierrosta minuutissa pyöriväksi tai 1500 kierrosta, koska tällaiset generaattorit ovat halvempia kuin hitaammat generaattorit. On myös mahdollista tehdä hitaampia generaattoreita, jotka pyörivät samalla akselilla turbiinin potkurin kanssa. Nämä tosin ovat hieman kalliimpia, mutta säästävät siinä, ettei tarvita vaihdelaatikkoa ja muita sen tarvitsemia osia.

#### 4.3 Vierintälaakeroinnin suunnittelu

Laakerointi on koneen sydän. Se on helposti rikkoontuva komponentti, joka ottaa vastaan kaikki veden mukana tulevan partikkelin aiheuttamat iskut. Pienissä Kaplan-turbiineissa käytetään pääasiassa vierintälaakereita.

##### 4.3.1 Laakerointi

Laakerointia sanotaan koneiden sydämeksi. Laakerointi mahdollistaa akselin pyörimisen ja voimien vastaanottamisen koneessa. On kahdentyyppisiä laakereita, liukulaake-

reita ja vierintälaakereita. Pienissä Kaplan-turbiineissa käytetään vierintälaakereita, jotka tarvitsevat öljyä voitelemisen varten. Erilaisia voimia varten ovat radiaalilaakerit ja aksiaalilaakerit.

Radiaalilaakerina käytetään turbiinissa pallomaista rullalaakeria, lieriörullalaakeria tai kartiorullalaakeria. Aksiaalilaakerina käytetään kartiorullalaakeria tai pallomaista kartiorullalaakeria. Laakereiden mitat saadaan valmistajien kotisivuilta tai luetteloista, joita ne jakavat. Laakereiden numerosarjat ovat standardeja, joita eri valmistajat noudattavat. Ainoastaan päätteet niissä ovat valmistajakohtaisia. Laakerikirjasta löytyvät myös kaikki tarvittavat kestopuvut, sallitut pyörimisnopeudet sekä kaikki laakeroinnin mitoittamiseen tarvittavat kaavat ja tiedot.

#### 4.3.2 Laakeroinnin kestoiän mitoitus

Laakereiden kestoikä lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (7)$$

jossa  $L_{10}$  = kierrosten lukumäärä miljoonissa, mitä laakeri kestää

$C$  = dynaaminen kantavuusluku, löytyy laakerikirjasta

$P$  = voiman määrä mikä laakeriin vaikuttaa

$p$  = vakio (3 tai 3,3), joka laakeriin vaikuttaa.

Kun on saatu laakerin kierrosmäärä laskettua niin sen jälkeen lasketaan kuinka paljon laakeri pyörii vuodessa ja kierrosmäärä jaetaan tällä luvulla, saadaan kestoikä vuosina. Dynaaminen laakerilaskenta ei ota huomioon asennusvirheitä ja yksittäisiä kolhuja laakereihin vaan laakerin käynti oletetaan tasaiseksi käynniksi. Laakerilaskenta on suunniteltu siten, että laskenta on oikein 90 prosentin varmuudella laakeroinneissa.

#### 4.3.3 Laakeripesän suunnittelu

Laakeripesä täytyy suunnitella riittävän kestäväksi laakerointia varten, jotta olakkeet ja reunat ja muut muodot eivät jousta voimien vaikuttaessa. Lujuuutta voidaan parantaa

lisäämällä jäykisteitä ja materiaalien paksuutta kasvattamalla. Laakerit tarvitsevat tukevat tuentaolosuhteet ja laakerien välisyhteys suhteessa pesään täytyy olla oikea. Sovitteiden suositeltavat oikeat mitat löytyvät laakerikirjasta tai kokemuseräisestä tiedosta yrityksissä.

#### 4.4 Tiivistyksen suunnittelu

Turbiinin laakeritila ja generaattoritila täytyy tiivistää vedeltä, jotta se ei pääsisi aiheuttamaan vahinkoa turbiinin sisuskaluille. On olemassa staattisia tiivisteitä ja pyöriviä eli dynaamisia tiivisteitä.

##### 4.4.1 Tiivistys

Laakerointi vaatii öljyvoitelun pyörimisen ajaksi, jotta rullat tai kuulat liukuisivat hydrodynaamisen öljykalvon päällä kulumisen estämiseksi. Tätä varten täytyy laakeripesät tiivistää, jotta öljy ei vuotaisi ulos laakeripesästä.

Koneessa on myös muita kohtia, jotka täytyy tiivistää, jottei vesi pääse sisälle turbiiniin. Muun muassa generaattoritila vaatii kuivat olosuhteet toimiakseen normaalisti. Tällaisia tiloja tarvitaan myös kaapelointia ja vaihelaatikkoo varten.

##### 4.4.2 Staattisten tiivisteiden suunnittelu

Staattisia paikallaan pysyviä tiivisteitä ovat muun muassa o-renkaat tai jotkin muun muotoiset tiivisteet, jotka pysyvät paikallansa koko ajan. Näitä tiivisteitä varten täytyy koneistaa turbiinin osiin uria ja muotoja, joiden mitat löytyvät tiivistevalmistajien kotisivuilta ja luetteloista. Urien pinnankarheuden tulee olla todella sileä, mieluiten 1.6 Ra-arvoltaan, jotta tarvittava tiivistys tiivisteiden ja tiivistettävän kappaleen välillä onnistuisi.

##### 4.4.3 Laakereiden tiivisteiden suunnittelu

Pienillä putouskorkeuksilla käytetään erilaisia tiivistystapoja tiivistämään pyörivät koneenosat laakerit. Eräs mahdollisuus on käyttää poksitiivisteitä.

Tiivisteiden kiristäminen ja vaihdon helppous ovat rakenteen etuja. Materiaalina käytetään teflonia. Tiivisteiden on annettava vuotaa vähän voitelun varmistamiseksi. Tiivisteeseen on johdettava puhdasta painevettä jos vedessä on kuluttavia tai syövyttäviä epäpuhtauksia. Tämä estää myös ilmaa imeytymästä turbiiniin. (Huhtinen, 274)

Tämän lisäksi on kumisia akselitiivisteitä, jotka holkeilla tuetaan tiivistämään tiivistettävä kohta. Nämä tiivisteet tosin kuluttavat akselin pintaa.

Liukurengastiivisteet ovat tiivisteitä, jossa tiivistettävä kohta hoidetaan kahdella äärimmäisen sileällä renkaalla, jossa toinen rangas pyörii toista vasten. Materiaalina näissä renkaissa voidaan käyttää esimerkiksi hiiltä, terästä tai piikarbidia. Tiivisteiden runko-osa on kumia.

#### 4.5 Runkorakenne

Turbiinin runko on hyvinkin erilainen erimallisissa Kaplan-turbiineissa, mutta perusperiaatteeltaan runko täytyy mitoittaa riittävän tukevaksi, jotta veden aiheuttamat voimat eivät aiheuttaisi muodonmuutoksia ja tärinöitä koneeseen. Eli vaippalevyjä ja laippalevyjä täytyy paksunaa tai hitsata jäykistyslattoja riittävä määrä. Vesitiet täytyy suunnitella jouhevan muotoisiksi, jotta vesi pääsee liikkumaan siten, ettei koneen sisälle aiheudu pyörteitä, jotka heikentävät koneen hyötysuhdetta. Monesti rungot tehdään ruostumattomasta teräksestä tai sitten maalatusta rakenneteräksestä. Potkuripesä määrää turbiinin halkaisijan.

Potkuripesä mitoitetaan oheisella kaavalla

$$D = 4,3 * \sqrt[3]{\frac{Q}{n}} \quad (8)$$

jossa  $D$  = Potkuripesän halkaisija [m]

$Q$  = vesimäärä [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$n$  = pyörimisnopeus [rpm]

Potkuripesä määrää potkurin koon ja antaa turbiinille suunnittelulähtömitan ulkokuo-rella. Potkurin sisähalkaisija on noin  $0,5 * D$ . Potkuripesä täytyy olla riittävän jäykkä,



koska siihen kohdistuu vääntömomentti ja koneen painosta aiheutuva voima. Jäykkyyttä voidaan parantaa vaippalevyn ja laippalevyjen paksuutta kasvattamalla tai hitaamalla potkuripesään riittävä määrä jäykisteitä.

## 5 PIENVESITURBIINIEN KÄYTTÖMAHDOLLISUUKSIA

### 5.1 Vesiturbiinityyppien toiminta

On olemassa kolme erilaista vesiturbiinityyppiä. Pelton-turbiini, Francis-turbiini ja Kaplan-turbiini sekä lukuisia muunnelmia näistä turbiinityypeistä. Pelton-turbiini on tarkoitettu todella korkeisiin putouskorkeuksiin ja siinä putkessa oleva vesipatsaan hydrostaattinen paine muutetaan suuttimella liike-energiaksi. Suihku pyörittää juoksupyörää, jossa on kuppeja ottamassa veden suihku vastaan. Tämän jälkeen suihkun suunta muuttuu kuppien avulla ja vähentävät sen energiaa. Suihku aiheuttaa kuppeihin voiman, joka pyörittää turbiinin akselia ja näin ollen generaattoria.

Francis-turbiini ja Kaplan turbiini ovat ulkonäöltään enemmän samanlaisia, mutta Francisissa juoksupyörä on ikään kuin siipiratasmainen näköinen kun taas Kaplanissa potkuri on enemmän veneen potkurin näköinen. Molemmissa turbiineissa vesi johdetaan johtosiivillä potkurille tietyssä kulmassa ja potkuri pyörittää turbiinin akselia ja tämä taas generaattoria, joka voi olla samalla akselilla tai vaihdelaatikon yhteydessä.

Vedessä on potkurille tullessaan noin puolet paine-energiaa ja puolet nopeusenergiaa, joka saa turbiinin potkurin pyörimään generaattorin pyörimisnopeuden mukaan. Johtosiivet ja potkurin siivet voivat olla kiinteät tai säädettävät, riippuen ajettavasta veden virtausmäärästä. Pääasia kuitenkin on, että siipien lähtö- ja tulokulmat ovat laskettu hydrodynaamisesti nopeuskolmioiden avulla oikein.

Molemmille turbiineille vettä tuo tuloputki, joka voi olla tavallisen putken muotoinen tai koneen ympärille spiraalimaisesti levittyvä putki, joka päästää veden turbiiniin.

Molemmissa turbiineissa on potkurin jälkeen imuputki, jonka tehtävä on tehdä imua potkurin alapuolelle, jotta koko putouskorkeus saataisiin hyödyksi. Imuputken poikkipinta-ala kasvaa tietyllä prosentilla. Jos imuputki on kartion muotoinen, on imuputken kartion avauskulma noin 10-12 astetta. Monimutkaisemmissa mutkaputkissa mitat ja muodot ovat monimutkaisia ja ne ovat valmistajien salaisuuksia.

## 5.2 Pienvesivoimaloiden turbiinityypit

Pienvesivoimaloissa käytetään paljon matalaan putoukseen tarkoitettuja Kaplan-turbiineita tai Francis-turbiineja tai niiden muunnelmia, joissa johtosiivet ja potkurinsiivet ovat joko säädeltävissä tai kiinteästi hitsatut. Turbiinit voivat olla joko vaakasuunnassa tai pystyasennossa tai jossakin kulmassa näiden välillä. Niiden asennusasento riippuu siitä missä asennossa viemäriputket normaalisti ovat ja jonka tilalle mahdolliset koneistot tulisivat. Tuloputkia ja imuputkiakin on saatavilla monen mallista ja muotoista riippuen voimalaitospaikan tiloista ja olemassa olevista maastonmuodoista ja rakenteista. Eri turbiinimalleissa generaattori on sijoitettu joko turbiinin sisälle tai turbiinin ulkopuolelle vaihdelaatikon avulla.

Pienvesiturbiinien valmistajat tekevät aina ikään kuin räätälöityjä tuotteita, joten mahdollisuuksia erilaisille muunnoksille on olemassa paljon. Itse turbiini tyyppi on periaatteeltaan kuitenkin tietyn mallinen, ainoastaan dimensiot muuttuvat putouk korkeuden ja vesimäärän mukaan. Francis- ja Kaplan-turbiinien muunnelmia on yhtä paljon kuin on koneiden valmistajiakin. Heiltä saa koneiden detaljitiedot ja mitat. Koneet vaativat myös jonkinlaisen konetilan, jonne sijoittaa sähkökeskukset ja muut automaatiolaitteet, joten sekin pitää ottaa huomioon vesiturbiinilaitosta suunniteltaessa.

## 5.3 Sähköenergia viemäriverkostosta

Veden potentiaalienergian talteenotossa on tärkeää, että vesi pääsee virtaamaan vapaasti tietyllä putouk korkeudelta turbiiniin nähden ja, että välissä ei ole pumppua tekemässä energiaa vesiturbiinille. Tämä vain kuormittaa pumppua lisää, koska vesiturbiini jarruttaa veden virtausta. Periaatteessa veden virtausenergiaa saadaan kuitenkin aina talteen paikassa, jossa vesi pääsee virtaamaan vapaasti alaspäin.

Vesiturbiini pitäisi olla rakenteeltaan niin sanottu putkiturbiinityyppinen, jotta se saadaan asennettua lauhde- tai viemäri vesiputkistoon. Putkiin pitää tehdä kiinnityslaipat vesiturbiinia varten ja turbiinin jälkeen pitää asentaa imuputki, jotta koko putouk korkeus saataisiin hyödynnettyä. Kysymykseen tulee joko Kaplan- tai Francis-turbiini tai näiden muunnelma, koska Pelton-turbiini on tarkoitettu todella korkeille putouk korkeuksille yli sataan metriin ja pienille vesimäärille. Huomioon pitää ottaa myös se, että turbiinit vaativat myös tilat sähkökeskuksille ja automaatiolaitteille, joten paikkoja näitä varten lienee niukalti.

Huomioon täytyy ottaa, että viemäriverkostossa veden tiheys on veden normaalia tiheyttä suurempi johtuen kiintopartikkeleista veden joukossa. Jotenkin olisi pystyttävä arvioimaan kuinka paljon putkistossa kulkee vettä ja mikä on vapaa putouskorkeus vedelle, jossa vesi pääsee vapaasti virtaamaan turbiinin potkurille. Eli ylä- ja alaveden pinnankorkeudet pitäisi myös kyetä mittaamaan. Mutta nämä tiedot varmasti löytyvät putkistojen rakennesuunnittelupiirroksista. Ylä- ja alaveden pinnankorkeuksien määrittäminen voi olla hankalaa sillä viemäriputkistoissa on pumppuja, joilla on tietty imukorkeus ja vesipatsaan kehityspaine.

#### 5.4 Sopiva turbiinityyppi viemäriverkoston

Kaplan-muunnelma turbiinista soveltuu parhaiten viemäriverkoston, koska sen saa asennettua suoraan putkeen kiinni. Oletuksen tietenkin on, että viemäriputki on myös terästä, jolloin siihen saa hitsattua laipan, johon turbiiniputket saadaan hitsattua kiinni. Lisäksi turbiinin generaattorille saadaan luonnonmukainen jäähdytys, koska generaattori on turbiinin sisällä ja ohivirtaava vesi jäähdyttää näin ollen generaattoria. Pelton-turbiini vaatii korkean putouskorkeuden, jotta aikaansaataisiin korkeapaineinen vesisuihku juoksupyörälle. Lisäksi siipirasmainen juoksupyörä vaatisi paljon tilaa, eikä soveltuisi viemäriverkoston, jossa mukana saattaa tulla kiintoaineitakin. Francis-turbiini taas vaatii spiraalimaisen putkirakenteen turbiinin ympärille, jotta potkuri saa vettä koneen sivuilta. Tämä taas on kallista rakentaa, koska viemäriputken ympärille pitäisi rakentaa kallis spiraaliputki, joka vaatisi myös paljon tilaa viemäriputken ympäriltä. Lisäksi Francisturbiini on kalliimpi johtuen monimutkaisemmasta potkurirakenteestaan.

#### 5.5 Kannattavuuslaskelma turbiinin asentamisesta viemäriverkoston

Seuraavassa on kannattavuuslaskelma turbiinin asentamisesta viemäriverkoston, jossa putouskorkeutta on 5 metriä ja veden tilavuusvirta  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Oletuksena on, että vesi pääsee virtaamaan vapaasti ilman, että täytyy pumpulla pumpata vettä putkessa. Tuotteen hinnat ovat yhden koneen toteuttamista varten. Jos tuote on sarjatuote niin niin silloin suunnittelun osuudet tulevat vain yhdelle koneelle. On myös oletettu, että koneen vieressä on tilaa automaatiolaitteille. Voimalaitoksen perustamiskustannukset ovat seuraavat:

- Koneen osat 30000 €

- Hydraulikka 5000 €
- Putkien ja läppäventtiilin osat 15000 €
- Koneen kokoonpanoasennus 10000 €
- Koneen suunnittelu 15000€
- Sähkökeskus 5000 €
- Sähkösuunnittelu 20000 €
- Koeajosuunnittelu 1000 €
- Liittymä verkkoon 30000 €
- Koneiden ja putkien asennus paikan päällä 10000 €
- Konehuoneen asennukset 5000 €

Yhteensä laitoksen rakennus maksaa 146 000 euroa. Laitos tuottaa vuodessa sähköä, jos mitoitusvirtaama  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  pysyy vakiona ja jos lasketaan vuoden kaikki tunnit mukaan (8760 h)

$$E = Pt \quad (9)$$

jossa E = Energiamäärä [Wh]

P = Teho [W]

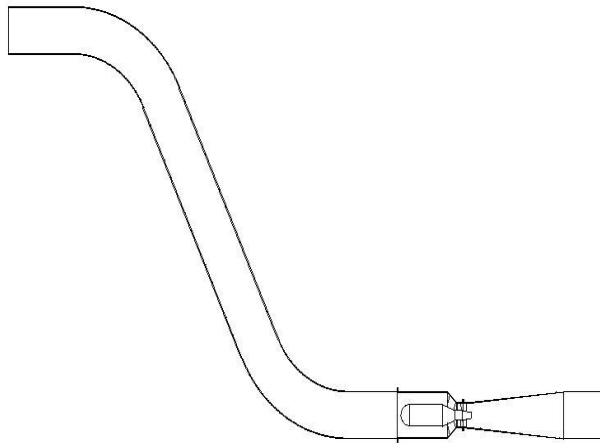
t = Aika [8760 h]

$$E = Q H \rho g \eta t h =$$

$$0,5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 5 \text{ m} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,8 \cdot 8760 \text{ h} = 171\,871\,200 \text{ Wh}$$

Jos sähkön myyntihinta on 0,03 €/kWh niin rahaa tulee vuodessa  $0,03 \text{ €/kWh} \cdot 171\,871 \text{ kWh} = 5156 \text{ €}$ . Jos oletetaan, että rahoitus investointiin on olemassa ilman pankkilainaa, niin silloin takaisinmaksuaika on  $146\,000 \text{ €} / 5156 \text{ €} = 28$  vuotta. Todellisuudessa on vaikea löytää sopivaa paikkaa, jossa veden vapaa putouskorkeus olisi 5 metriä ja, että linjaan ei olisi asennettua pumppua. Lisäksi mitoi-

tusvirtaama tulisi olla hyvin tasainen, mutta todellisuudessa vettä tulee välillä liikaa ja välillä liian vähän. Silloin kun tulee liikaa vettä, niin turbiinin ohi pitäisi tehdä ohijuoksutusputki, joka osaltaan nostaa rakennuskustannuksia.



Kuva 14. Turbiini, tuloputki ja imuputki.

## 5.6 Turbiinin sähkötehon määrittäminen

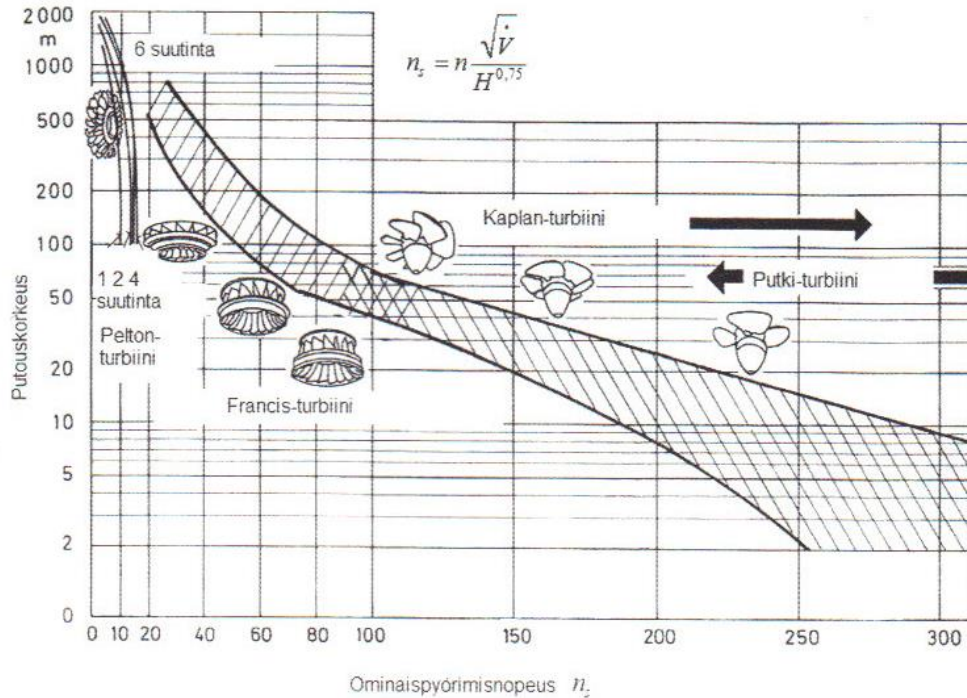
Turbiinin sähköteho on noin 80 % luonnontehosta. Tämä saadaan aikaan siten, että turbiinin hyötysuhde on noin 90 %, imuputken hyötysuhde on noin 93 % ja kes- tomagneettigeneraattorin hyötysuhde on noin 97 %. Jos putouskorkeus  $H$  on 5 m ja tilavuusvirta  $Q$  on  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  on turbiinin sähköteho

$$P = Q H \rho g \eta =$$

$$0,5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 5 \text{ m} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,8 = 19620 \text{ W} = 19,6 \text{ kW}$$

## 5.7 Turbiinin fyysinen koko

Turbiinin kannattavuuslaskelma on laskettu turbiinille, jonka halkaisija on 800 mm ja joka pitäisi asentaa siis vähintään 800 mm:seen viemäriputkeen tai sitten tehdä putken muunnoskappale. Oheisesta taulukosta katsotaan ominaispyörimisnopeus, joka on 5 m:n putouksella ja vesimäärällä 0,5 m<sup>3</sup>/s.



Kuva 15. Vesiturbiinien käyttöalueet. (Huhtinen ym. 2008, 266)

$$n = \frac{n_s H^{0.75}}{\sqrt{Q}} = \frac{250 \text{ rpm} \cdot 5^{0.75} \text{ m}}{\sqrt{0.5 \text{ m}^3/\text{s}}} = 1182 \text{ rpm}$$

Valitaan pyörimisnopeudeksi 6 napainen kestopagneettigeneraattori, jolloin pyörimisnopeudeksi saadaan 1000 rpm. Tämän jälkeen lasketaan turbiinin potkurin halkaisija joka on vesimäärällä 0,5 m<sup>3</sup>/s

$$D = 4,3 \sqrt[3]{\frac{Q}{n}} = 4,3 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1000 \text{ rpm}}} = 0,341 \text{ m}$$

Joten potkuripesän halkaisija täytyy olla 350 mm ja turbiinin putken ulkohalkaisija hieman suurempi eli 500 - 800 mm. Tälle koolle on tärkeää, että se on pinta-alaltaan vain isompi kuin potkuripesä ja todellinen halkaisijavalinta riippuu generaattorin halkaisijasta. Joten pinta-ala ulkohalkaisijan kohdalta vähennettynä sisähalkaisijalla täytyy olla isompi kuin potkuripesä.

Halkaisija voi olla myös tätä suurempi, mutta ei mielellään pienempi, johtuen turbiinin liian pienestä koosta kokoonpanon suhteen ja siitä, että pienemmissä viemäriputkissa ei virtaa niin paljon vettä. Sen takia kone pitäisi asentaa sellaiseen kokoaja-viemäriputkeen, johon on yhdistynyt jo pienempiä viemäriputkia ja jotka sijaitsevat jo lähempänä pumppaamoja. Lasketaan esimerkiksi paljonko 20000 ihmisen lähiöstä tulee suihkuvettä tai hanavettä sekunnissa, niin saadaan keskiarvolukema  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Esimerkissä on oletettu, että noin 1000 ihmistä laskee vettä sekunnissa ja että hanasta tulee noin  $0,2 \text{ l/s}$ .

Turbiinin ulkomitta siis voi olla 800 mm tai isompi riippuen viemäriverkoston mitoituksesta. Turbiinin pituus on noin 2,5 kertaa halkaisijan pituus. Lisäksi pitää ottaa huomioon läppäventtiilien ja imuputken vaatima pituus. Läppäventtiili on pyöreä, joten sen pituus on sama kuin halkaisija. Lisäksi pitää pyörteiden takia olla pieni välimatka turbiiniin. Imuputken pituusmitta on noin 2 kertaa koneen mitta. Imuputken suu on saman halkaisijainen kuin potkuripesä, josta se lähtee noin 11 - 12 asteen avauskulmalla suurenemaan viemäriputken mitta. Lisäksi koneiden vaatimat sähkökeskukset ja hydraulikoneikot vaativat oman tilansa. Mielellään tämä tila saisi olla alle 50 metrin päässä turbiinitilasta, jottei sähkökaapeleihin jäisi turhia tehohäviöitä.

## 5.8 Turbiinin asennuksessa viemäriverkostoon ilmenevät ongelmat

Turbiini jarruttaa veden virtausta, joten olisi hyvä varmistua, että tästä ei koidu ongelmia veden pääsystä eteenpäin putkistossa. Jos joudutaan turbiinin takia asentamaan ylimääräinen pumppu, niin silloin ollaan tilanteessa, jossa turbiinin energia menee pumpun energian tuottamiseen häviöineen. Lisäksi turbiini tarvitsee ohitusputken, jotta veden virtaus saadaan kulkemaan myös silloin, kun turbiini on huollossa tai sitä ei jostain syystä ajeta. Mahdollisia värinäongelmia voi ilmetä, jos rakenteita ei vahvisteta ja tueta riittävästi, joten suunnitteluun täytyy hieman panostaa.



## 5.9 Turbiinin asennus Utista tulevalta veden runkolinjalle

Teoriassa turbiinin asennus käyttövesivesiputken runkolinjaan Utista Kymenlaaksoon voisi perustella jo sillä syyllä, että Utin pinnankorkeus merenpinnasta on 105 m ja Kotkan päässä korkeus merenpinnasta on 60 m, joten putouskorkeutta tulisi 45 metriä. Vettä linjastossa kulkee 250 litraa sekunnissa. Joten luonnontehoksi tulisi

$$P = Q H \rho g = 0,25 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 45\text{m} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 110\,362\text{ W} = 110\text{ kW} \quad (12)$$

jossa  $Q$  = virtaama [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$H$  = putouskorkeus [m]

$\rho$  = veden tiheys [ $1000\text{ kg}/\text{m}^3$ ]

$g$  = putoamiskiihtyvyys [ $9,81\text{ m}/\text{s}^2$ ]

Linjaan pitäisi valita Francis-turbiini johtuen suuresta putouskorkeudesta. Putkessa olevaa vesipainetta pudotetaan tällä hetkellä kuristusventtiileillä, jotta paine saadaan vesijohtoverkostoon sopivaksi. Eli energiaa hukataan tahallaan tällä hetkellä, joten siitäkin syystä turbiini sopisi hyvin jarruttamaan veden painetta putkistoon ja toimimaan kuristusventtiilin sijaisena.

Käytännössä turbiinin asentaminen on vaikeaa, sillä maan alla kulkevaan putkilinjaan ei ole tehty hirveän isoja huoltotiloja, joihin turbiinin voisi sijoittaa, joten kaikki pitäisi rakentaa alusta saakka. Kuristusventtiilinen luona on noin 2 x 2 metrin kokoiset huoltomökit, joihin iso Francis-turbiini ei mahdu spiraali- ja ohitusputkineen. Tämänlainen turbiiniratkaisu on Helsingissä Kalliomäen luolassa, jossa on Francis-turbiini ottamassa talteen energiaa Päijänne-järvestä tulevasta juomavedestä.

## 6 YHTEENVETO

Vesivoima on uusiutuva luonnonvara, jota kannattaisi rakentaa lisää. Pienvesivoima on osa Suomen uusiutuvia energiantuotantomuotoja. Sen rakentaminen tulee koko ajan kannattavammaksi, kun energian hinta nousee ja joudutaan rahtaamaan Suomeen fossiilisia polttoaineita. Vesivoima on hyvin pitkäikäinen investointi, mutta koneiden investointien jälkeen sen ylläpito on halpaa ja sähköä on saatavissa monta vuosikymmentä, koska laitteet kestävät pitkään. Vesivoima ei aiheuta lainkaan kasvihuonekaasuja.

Työssä on tutkittu pääasiassa Kaplan-turbiinin ominaisuuksia ja mahdollisuuksia asentaa sitä viemäriverkostoon ja runkovesilinjaan. Se ei nykyisillä sähkön hinnoilla vielä ole kannattavaa, mutta sekin paranee kaiken aikaa. Työ sopii esimerkiksi lähdetiedoksi turbiinia suunnittelevalle ja muuten vesiturbiinista kiinnostuneelle.

Turbiinin suunnitteluun tarvitaan perustiedot turbiinin liittyvästä fysiikasta, hydrodynamiikasta, mekaniikkasuunnittelusta ja koneensuunnittelun osaamista. Turbiini sinä-länsä on yli sata vuotta vanha keksintö ja periaatteet ovat yhä samat. Parannuksia on tosin tullut valmistusmenetelmiin, turbiinin komponentteihin ja hyötysuhteeseen, jotta vanhojen turbiinien korvaaminen uusilla on mahdollista taloudellisesti.

Vesivoiman tulevaisuus näyttää hyvältä. EU:n jatkuvien ilmastopöytäkirjojen ja uusiutuvien energialähteiden lisäämisvelvoitteiden valossa vesivoimalla on jatkuva kysyntä. Varsinkin pienvesivoimalla on Euroopassa lukuisia sijoituspaikkoja, ainoastaan ainoana kompastuskivenä on saada projektit taloudellisesti kannattaviksi. Tätä taustaa vasten laitosten hyötysuhde on ratkaiseva tekijä.

Työssä päästiin tavoitteeseen, eli selvitettiin kuinka kannattavaa ja mahdollista on toteuttaa vesiturbiiniprojekteja viemäriverkoston ja veden runkotulolinjaan. On investoijan harteilla millaisia takaisinmaksuaikoja hän haluaa projekteilta, mutta kaikki on teknisesti mahdollista.

Tutkimusta voisi jatkaa selvittämällä minkä hintaista on tehdä rakennustiloja vesiturbiineille vesilinjoin. Tämä ratkaisee suurelta osin investointien kannattavuuden. Olemassa olevia rakenteita vesiturbiineja varten ei tahdo löytyä.

## LÄHTEET

Energiateollisuus. Sähkön tuotanto. Viitattu 4.5.2014. Saatavissa:

<http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/sahkontuotanto>

Francis-turbiinin rakenne. Chalmers. Viitattu 4.5.2014. Saatavissa:

<http://www.tfd.chalmers.se/~hani/phdproject/francispicture.gif>

Hellgren M., Heikkinen L., Suomalainen L., Kala J. 1999. Energia ja ympäristö. 3. painos. Helsinki: Hakapaino Oy

Huhtinen M., Korhonen R., Pimiä T., Urpalainen S.. 2008. Voimalaitostekniikka. 1. painos. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy

Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus. 1981. Vesivoimalaitokset. 2.painos. Helsinki: Insinööriliitto Oy

Internetix. Generaattori. Viitattu 4.5.2014. Saatavissa:

[http://opinnot.internetix.fi/fi/muikku2materiaalit/lukio/fy/fy7/3\\_sahkomagneettinen\\_in\\_duktio/01?C:D=iGv5.iFFu&m:selres=iGv5.iFFu](http://opinnot.internetix.fi/fi/muikku2materiaalit/lukio/fy/fy7/3_sahkomagneettinen_in_duktio/01?C:D=iGv5.iFFu&m:selres=iGv5.iFFu)

Kemijoki. Vesivoima. Viitattu 4.5.2014. Saatavissa: [http://www.kemijoki.fi/kejo-fi/sp\\_Content32B79](http://www.kemijoki.fi/kejo-fi/sp_Content32B79)

Motiva. Pienvesivoima. Viitattu 4.5.2014. Saatavissa:

[http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/vesivoima/pienvesivoima](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/vesivoima/pienvesivoima)

Perttula Jarmo. 1999. Kone- ja energiatekniikka. 1.painos. Helsinki: Hakapaino Oy

Saahkarin kone. Putkiturbiini. Viitattu 4.5.2014. Saatavissa:

<http://www.tanasui.co.jp/productsTurbinesEn.html>

Takkinen Vesa. 1994. Insinööriyö Pienvesivoimalaitokset sähkön tuotannossa. 1. painos. Helsinki

Tanaka. Crossflow turbine. Viitattu 4.5.2014. Saatavissa:

<http://www.tanasui.co.jp/productsTurbinesEn.html>